



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 103 04 822.7

**Anmeldetag:** 31. Januar 2003

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen/DE

**Bezeichnung:** Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der  
Polarisationszustandsbeeinflussung durch ein  
optisches System und Analysator

**Priorität:** 29.07.2002 DE 102 35 514.2

**IPC:** G 01 J, G 01 B

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der  
ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 14. April 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Agurks

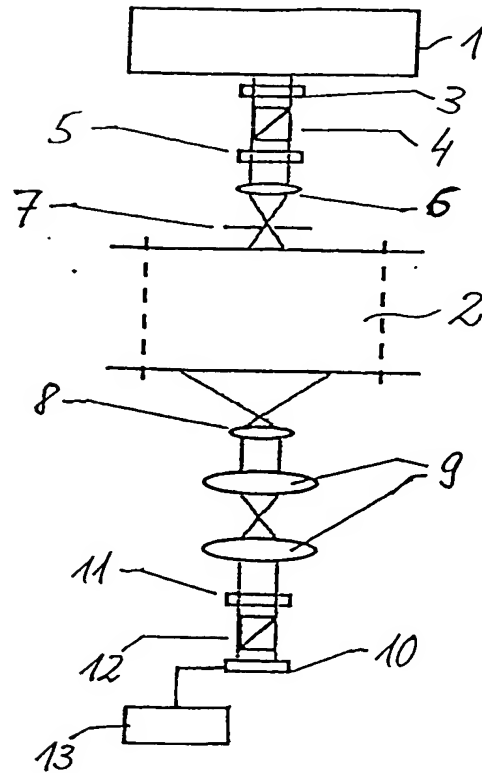
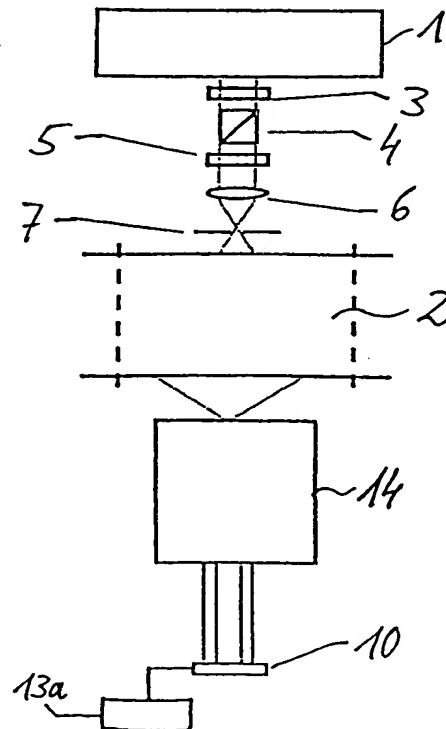
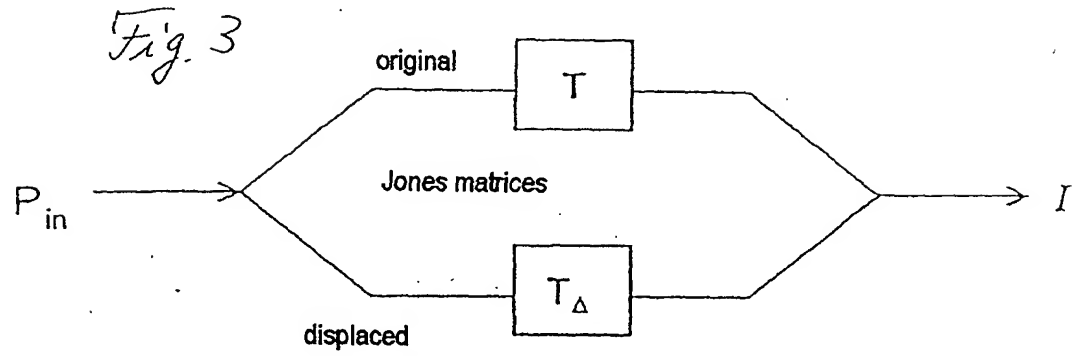


Fig. 2





*Fig. 4*

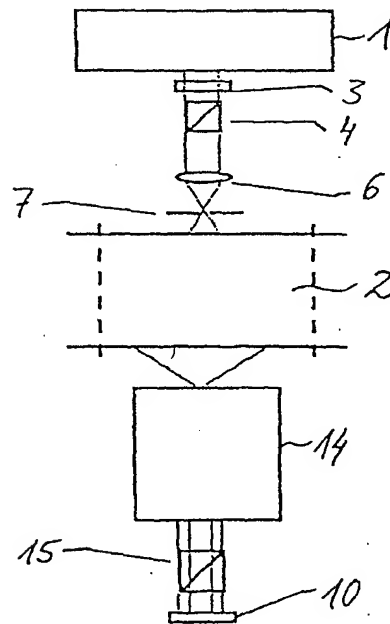


Fig. 5

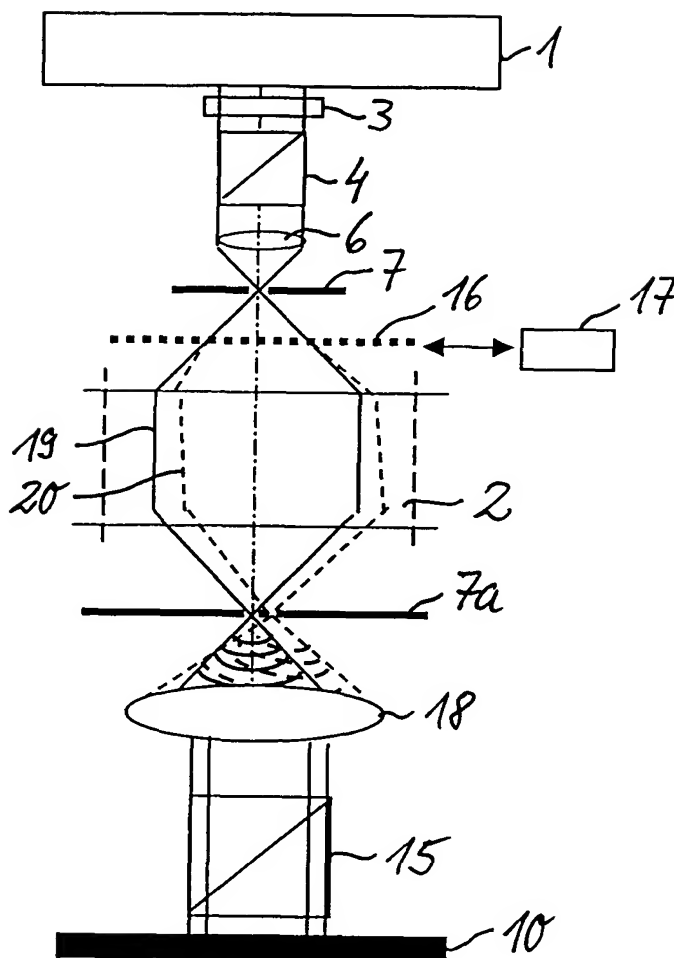


Fig. 6

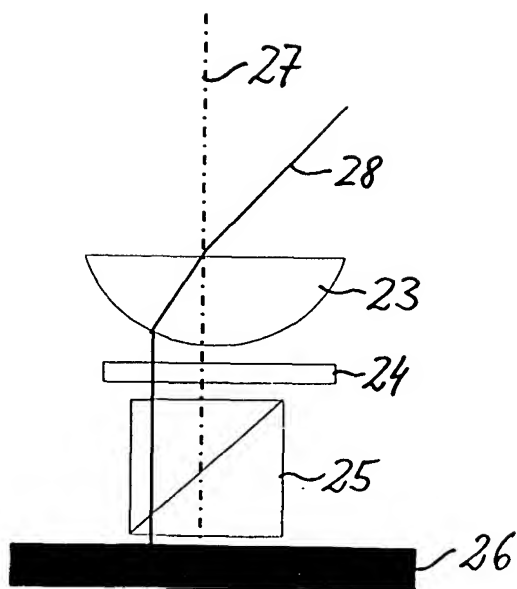


Fig. 7

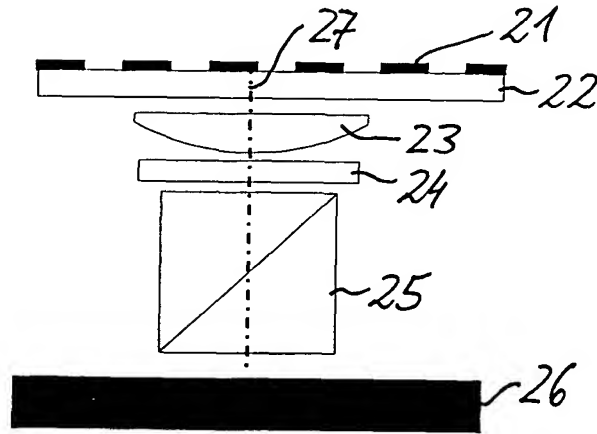


Fig. 8

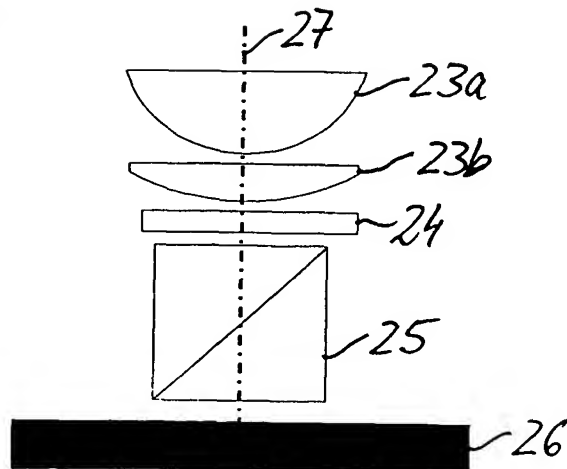


Fig. 9

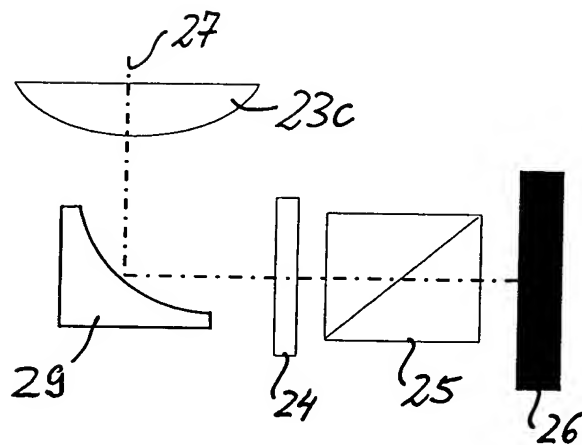
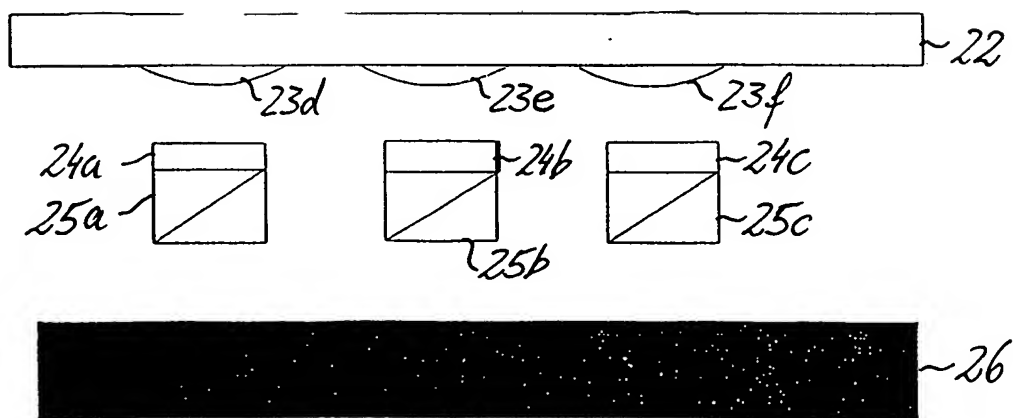


Fig. 10



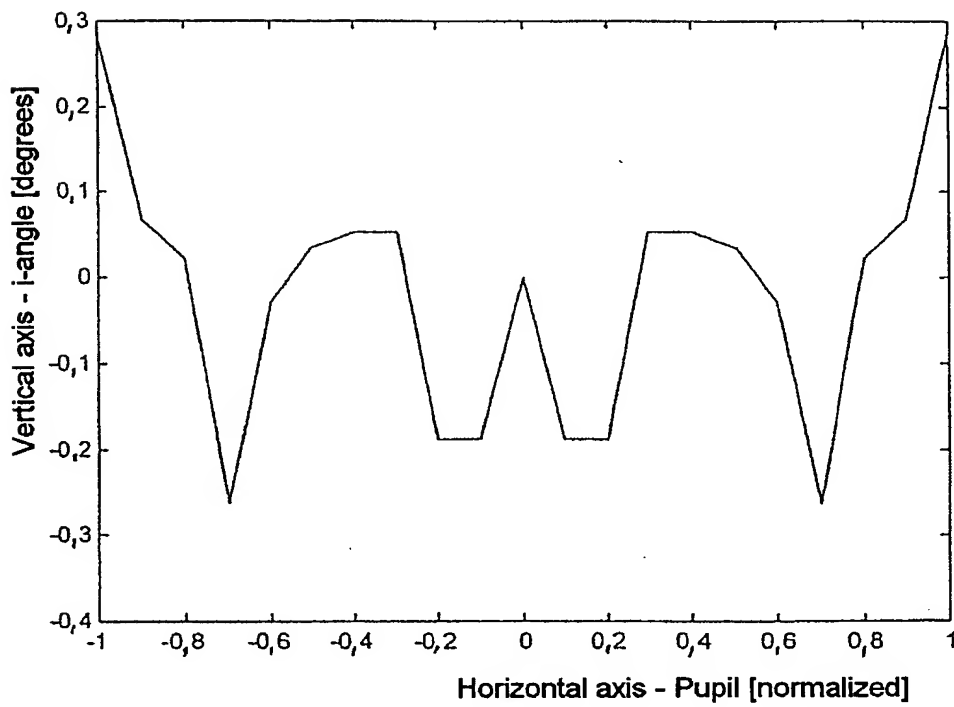


Fig. 11

Anmelder:

Carl Zeiss SMT AG  
Carl Zeiss Straße 22  
73447 Oberkochen

Unser Zeichen: P 41565 DE1

28. Januar 2003 EW/rc

Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Polarisationszustands-  
beeinflussung durch ein optisches System und Analysator

- 5 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung der von  
einem optischen System verursachten Beeinflussung des Polarisations-  
zustands optischer Strahlung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1,  
auf ein Bildfehlerkorrekturverfahren sowie auf eine zur Durchführung  
solcher Verfahren geeignete Vorrichtung nach dem Oberbegriff des An-  
10 spruchs 8 und eine in letzterer verwendbare Polarisationsanalysatoran-  
ordnung.

- Es sind verschiedene Verfahren und Vorrichtungen bekannt, mit denen  
bestimmt werden kann, wie ein optisches System den Polarisationszu-  
15 stand optischer Strahlung beeinflusst. Unter dem Begriff optisches Sys-  
tem ist dabei jedwede Anordnung einer oder mehrerer Optikkomponen-  
ten zu verstehen, die einfallende optische Strahlung transmittieren  
und/oder reflektieren, insbesondere auch Linsen und damit aufgebaute  
Objektive. Unter dem Begriff optische Strahlung ist vorliegend eine be-  
20 liebig elektromagnetische Strahlung zu verstehen, mit denen das un-  
tersuchte optische System beaufschlagt wird, z.B. sichtbares Licht oder  
UV-Strahlung. Besonders verbreitet sind Ellipsometrieverfahren und



Ellipsometrievorrichtungen in diversen Ausprägungen. Zur Beschreibung des Polarisationszustandes sowie dessen Beeinflussung bzw. Änderung durch das optische System dienen geeignete Größen, wie die Stokes-Parameter, die Müller-Matrix, die Polarisationsmatrix und die Jones-Matrix. Für diesbezügliche Details kann auf die einschlägige Literatur verwiesen werden.

Ein Verfahren und eine Vorrichtung der eingangs genannten Art sind in der Patentschrift US 5.298.972 offenbart. Bei diesem Verfahren und dieser Vorrichtung wird die von einem optischen System verursachte Beeinflussung des Polarisationszustands integral bestimmt, und zwar durch Bestimmung eines einzelnen, dem untersuchten optischen System zugeordneten Stokes-Parametersatzes und der daraus resultierenden Jones-Matrix. Die Strahlung wird über je eine Einmodenfaser auf die Optikkomponente gerichtet und von dieser abgeführt, wodurch eine räumliche Strahlfilterung bewirkt wird.

Bekannt ist die Ausnutzung von Polarisierungseffekten auch zur Erzeugung von Polarisationsbildern von Objekten. Die Patentschrift US 5.396.329 zeigt ein entsprechendes Bildaufnahmesystem, das zusätzlich zu einer Abbildungsoptik einen optischen Retarder z.B. in Form eines Kompensators und diesem nachgeschaltet einen Linearpolarisator aufweist, die beide drehbeweglich angeordnet sind. Als Bilddetektionseinheit dient z.B. eine Bildkamera, ein CCD-Detektor oder eine Reihe einzelner Detektorelemente. Die rechnerische Auswertung erfolgt über die Stokes-Parameter und je eine Müller-Matrix für jede polarisationsrelevante Komponente.

Die Patentschrift US 5.166.752 offenbart ein Ellipsometriesystem, bei dem ein paralleles Eintrittsstrahlenbündel auf ein untersuchtes optisches System fokussiert wird, so dass die einzelnen Strahlen unter verschiedenen Winkeln einfallen, und der vom untersuchten optischen System

reflektierte oder transmittierte Strahlenkegel in ein paralleles Austrittsstrahlenbündel refokussiert wird. Als Detektoreinheit dient eine Reihe von einzelnen Detektorelementen, auf die jeweils Lichtstrahlen auftreffen, die aus einem engen Bereich von Einfallswinkeln auf das untersuchte optische System stammen. Dies soll eine gleichzeitige Detektion des Polarisationszustands von unter verschiedenen Einfallswinkeln auf das untersuchte System einfallenden Lichtstrahlen ermöglichen, ohne dass dazu ein abrasternder Detektionsvorgang notwendig ist. Mit diesem Ellipsometriesystem werden insbesondere Proben optischer Materialien auf Eigenschaften untersucht, die eine Polarisationszustandsänderung hervorrufen, bei Messung in Transmission speziell die Doppelbrechung eines optischen Volumenmaterials.

Zur Ermittlung der Abbildungsgüte von hochpräzise abbildenden Optiken können bekanntermaßen Wellenfrontsensoren eingesetzt werden, mit denen Abweichungen der bildseitigen Wellenfronten vom idealen Abbildungsverhalten sehr genau bestimmt werden können. Hierzu sind z.B. sogenannte Shearing-Interferometer im Gebrauch. Eine darauf basierende Wellenfronterfassungsvorrichtung ist in der Offenlegungsschrift DE 101 09 929 A1 offenbart. Diese Vorrichtung eignet sich insbesondere auch zur Bestimmung der Abbildungsqualität von Projektionsobjektiven mikrolithographischer Projektionsbelichtungsanlagen und beinhaltet Mittel zur Bereitstellung einer Wellenfrontquelle, z.B. mit einem Lichtleiter und einer an dessen Ausgang angeordneten Lochmaske, in der Objektebene des untersuchten optischen Abbildungssystems und ein Beugungsgitter in der zur Objektebene konjugierten Bildebene. Dem Beugungsgitter ist ein ortsauflösender Strahlungsdetektor nachgeschaltet, z.B. in Form eines CCD-Chips, wobei eine zwischenliegende Optik das vom Beugungsgitter erzeugte Interferogramm auf die Sensorfläche des Detektors abbildet. Diese Art von Wellenfrontsensorik kann das Abbildungssystem mit derselben Strahlung untersuchen, die vom Abbildungssystem in seinem normalen Betrieb verwendet wird, und sie kann

mit dem Abbildungssystem in einer Baueinheit integriert sein. Dieser Wellenfrontsensortyp wird daher auch als Betriebsinterferometer (BIF) bezeichnet.

- 5 In der nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldung 102 17 242.0 wird eine Messvorrichtung beschrieben, die insbesondere eine derartige BIF-Vorrichtung sein kann und zur interferometrischen Vermessung eines optischen Abbildungssystems dient, das zur Abbildung eines an einer Maske vorgesehenen Nutzmusters in die Bildebene dient, 10 wozu die Maske in der Objektebene angeordnet wird. Es wird vorgeschlagen, die Wellenfrontquelle für die interferometrische Vermessung durch ein zusätzlich zum Nutzmuster an der Maske ausgebildetes Messmuster zu realisieren.
- 15 Eine weitere, in der Praxis verwendete Methode der Wellenfronterfassung hochpräziser Abbildungssysteme stellt die Punktbeugungs-Interferometrie (Point-Diffraction-Interferometrie) dar, deren Grundprinzipien in der einschlägigen Fachliteratur beschrieben sind, siehe z.B. D. Malacara, „Optical Shop Testing“, Kap 3.7., John Wiley, New York, 20 1991. Spezielle Ausführungen sind in den Patentschriften US 6.344.898 B1 und US 6.312.373 und den Offenlegungsschriften JP 11-142291 und WO 02/42728 angegeben.

- Bei modernen hochpräzisen Abbildungssystemen hoher numerischer 25 Apertur, wie sie z.B. als mikrolithographische Projektionsobjektive eingesetzt werden, ist der Einfluss des Abbildungssystems auf den Polarisationszustand der eingesetzten Strahlung kaum mehr zu vernachlässigen. So ergeben sich z.B. polarisationsbedingte Auswirkungen auf die Abbildungsqualität durch Doppelbrechung bei Linsen aus Calciumfluorid, 30 wie sie häufig für kurze Wellenlängen verwendet werden, und durch Polarisierungseffekte an Umlenkspiegeln. Es besteht daher ein Bedarf, die Beeinflussung des Polarisationszustands von optischen Abbildungssys-

temen hoher Apertur möglichst gut quantitativ bestimmen zu können, um daraus Rückschlüsse auf die polarisationsabhängige Abbildungsqualität zu ziehen.

- 5 Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung eines neuartigen Verfahrens und einer neuartigen Vorrichtung der eingangs genannten Art sowie einer hierbei verwendbaren Polarisationsanalysatoranordnung zugrunde, mit denen sich die von einem untersuchten optischen System verursachte Beeinflussung des Polarisationszustands einer verwendeten Strahlung bzw. eine Bildfehlerkorrektur vergleichs-
- 10 weise genau bestimmen lassen, so dass sie sich insbesondere auch dafür eignen, bei optischen Abbildungssystemen den polarisationsbedingten Einfluss auf die Abbildungsqualität sehr präzise zu ermitteln.
- 15 Die Erfindung löst dieses Problem durch die Bereitstellung eines Verfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 1 oder 7 und einer Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 8 sowie einer Polarisationsanalysatoranordnung mit den Merkmalen des Anspruchs 15 oder 16. Beim Verfahren nach Anspruch 1 und der Vorrichtung nach Anspruch 8 ist das
- 20 untersuchte optische System ein optisches Abbildungssystem vorgegebbarer Apertur, dessen Beeinflussung des Polarisationszustands pupillenaufgelöst bestimmt wird. Unter dem Begriff „pupillenaufgelöst“ ist dabei eine winkelaufgelöste Bestimmung dieser Polarisationszustandsbeeinflussung über wenigstens einen Teil des durch die Apertur gegebenen
- 25 Pupillenbereichs des optischen Abbildungssystems hinweg zu verstehen.

- Die Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung erfolgt somit pupillenaufgelöst für die einzelnen Koordinatenpunkte des berücksichtig-
- 30 ten Pupillenbereichs und nicht als bloße integrale, örtlich nicht aufgelöste Messung. Dies erlaubt eine pupillenaufgelöste Untersuchung des optischen Abbildungssystems auf eventuelle optische Abbildungsfehler, die

durch die Beeinflussung des Polarisationszustands bedingt sind. Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die Untersuchung auf Abbildungsfehler bei hochpräzisen Projektionsobjektiven von Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen zur Waferbelichtung in der Halbleiterbauelementfertigung, wo sehr feine Strukturen z.B. mit UV-Strahlung von einer Maske auf einen Wafer zu übertragen sind.

10 In einer Weiterbildung des Verfahrens nach Anspruch 2 wird in der Objektebene des Abbildungssystems ein definierter Eintritts-Polarisationszustand bereitgestellt und der Austritts-Polarisationszustand innerhalb eines vorgebbaren Pupillenbereichs des Abbildungssystems pupillenaufgelöst gemessen.

15 Eine Weiterbildung des Verfahrens nach Anspruch 3 sieht vor, als eintrittsseitige Strahlung eine von der Objektebene des Abbildungssystems ausgehende, räumlich inkohärente Punktlichtstrahlung bereitzustellen. Hierzu eignet sich eine nach Anspruch 9 weitergebildete Vorrichtung, die eine Lochblende mit einer oder mehreren Öffnungen in der Objektebene des Abbildungssystems und vorgeschaltete erste Polarisationsmittel umfasst. Letztere können in Weiterbildung der Vorrichtung nach Anspruch 20 eine Polarisatoreinheit und/oder in serieller Anordnung eine Kompensatoreinheit beinhalten, die in verschiedenen räumlichen Orientierungen einstellbar sind. Dies kann durch Verwendung drehbarer Polarisatoren bzw. Kompensatoren oder von unterschiedlichen, zuschaltbaren optischen Kanälen mit voreingestellten Polarisator-/Kompensatoreinheiten 25 realisiert sein. In weiterer Ausgestaltung kann die Vorrichtung gemäß Anspruch 11 eine Streuscheibe vor den ersten Polarisationsmitteln enthalten.

30 Eine nach Anspruch 12 weitergebildete Vorrichtung weist als Polarisationsdetektormittel einen CCD-Detektor und vorgeschaltete zweite Polarisationsmittel auf. Die so ausgelegten Polarisationsdetektormittel ermög-

lichen die simultane pupillenaufgelöste Messung des Austritts-Polarisationszustands für alle Ortskoordinaten des betrachteten Pupillenbereichs in einem einzigen Messvorgang ohne Notwendigkeit eines alternativ möglichen Scannens, d.h. Abrasterns, des Pupillenbereichs  
5 durch einen punktförmig messenden Detektor.

Bei einem nach Anspruch 4 weitergebildeten Verfahren beinhaltet die Auswertung des Austritts-Polarisationszustands eine Ermittlung der phasenreduzierten Jones-Matrix aus einer ellipsometrischen Messung  
10 der Polarisationszustandsbeeinflussung.

Bei einer Weiterbildung des Verfahrens nach Anspruch 5 wird der pupillenaufgelöste, räumliche Verlauf der austrittseitigen Wellenfrontphase durch Shearing-Interferometrie oder Punktbeugungs-Interferometrie ermittelt. In Verbindung mit einer Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix z.B. nach dem Verfahren von Anspruch 4 kann daraus die vollständige, pupillenaufgelöste Jones-Matrix des optischen Abbildungssystems bestimmt werden. In diesem Fall verfügen die Polarisationsdetektormittel der verfahrensdurchführenden Vorrichtung in einer Weiterbildung nach Anspruch 13 über eine entsprechende Shearing- bzw. Punktbeugungs-Interferometereinheit.  
15  
20

Bei einem nach Anspruch 6 weitergebildeten Verfahren wird die austrittsseitig durch Shearing-Interferometrie bzw. Punktbeugungs-Interferometrie erhaltene Strahlung mit einer Polarisationsanalyse zur pupillenaufgelösten Bestimmung von Betrag und Phase der Matrixelemente der Jones-Matrix verknüpft.  
25

Das Verfahren nach Anspruch 7 beinhaltet eine detektionsseitige Bildkorrektur mittels optischer Rechenverfahren, z.B. Raytracing, oder eine messtechnische Bestimmung der Verzeichnung des Pupillenbildes. Diese Maßnahme erlaubt eine Verzeichnungskorrektur, so dass folglich ei-  
30

ne relativ einfache, kostengünstige detektionsseitige Optik verwendbar ist. Das Verfahren eignet sich hierbei sowohl in Verbindung mit den Maßnahmen nach Anspruch 1 bis 6 zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands durch ein optisches System als auch unabhängig davon für beliebige andere Anwendungen, bei denen eine Pupillenbildverzeichnungskorrektur wünschenswert ist. Insbesondere kann das Verfahren auch in wellenfronterfassenden Vermessungssystemen, wie dem oben erwähnten BIF-System, zum Einsatz kommen, auch in Systemvarianten ohne Berücksichtigung von Polarisationsinflüssen.

10

Für die Durchführung der Verfahrensvarianten mit Bestimmung der phasenreduzierten oder vollständigen, pupillenaufgelösten Jones-Matrix ist die Auswerteeinheit der verfahrensdurchführenden Vorrichtung in einer Weiterbildung nach Anspruch 14 entsprechend ausgelegt.

15

Die Polarisationsanalysatoranordnung gemäß Anspruch 15 bzw. 16 eignet sich gemäß Anspruch 19 insbesondere zur Verwendung als Polarisationsdetektormittel oder Polarisationspräparationsmittel bei der erfindungsgemäßen Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein untersuchtes optisches System. In vorteilhaften Ausgestaltungen gemäß Anspruch 17 beinhaltet die Anordnung eine strahlformende Optik aus einer oder mehreren sphärischen und/oder asphärischen refraktiven Linsen, aus einer oder mehreren diffraktiven Linsen, aus einem oder mehreren sphärischen und/oder asphärischen Spiegelementen oder aus einer Kombination der genannten optischen Elemente. In einer Ausführungsform befindet sich vor der strahlformenden Optik eine periodische Struktur, mit deren Hilfe z.B. die messtechnische Erfassung einer Pupillenbildverzeichnung nach Anspruch 7 realisiert werden kann.

30

Je nach Bedarf kann gemäß Anspruch 18 vorgesehen sein, die periodische Struktur lateral bewegungsgekoppelt mit einem nach dem Polarisations-

tionsanalysatorelement angeordneten Detektorelement anzuordnen oder die periodische Struktur und das Detektorelement ohne eine solche Kopplung zueinander lateral relativ beweglich zu halten.

- 5    Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden nachfolgend beschrieben. Hierbei zeigen:

10    Fig. 1    eine schematische Seitenansicht einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer zugeordneten Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands durch ein Projektionsobjektiv mittels ellipsometrischer Messung,

15    Fig. 2    eine Darstellung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage entsprechend Fig. 1, jedoch mit einer Vorrichtungsvariante zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands, die eine Shearing-Interferometereinheit beinhaltet,

20    Fig. 3    eine Schemadarstellung zur Erläuterung von Zweistrahl-Interferometrie im Jones-Matrix-Kalkül, wie sie der Funktionsweise der Vorrichtung gemäß Fig. 2 zugrunde liegt,

25    Fig. 4    eine Darstellung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage entsprechend Fig. 2, jedoch für eine Vorrichtungsvariante mit zusätzlichen Polarisationsanalysatormitteln an der Austrittsseite der Shearing-Interferometereinheit,

30    Fig. 5    eine Darstellung einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage entsprechend Fig. 2, jedoch für eine Vorrichtungsvariante, die als Punktbeugungs-Interferometer mit zusätzlichen Polarisationsanalysatormitteln arbeitet,



- Fig. 6 eine schematische Seitenansicht einer Polarisationsanalysatoranordnung, die als Polarisationsdetektormittel z.B. in Vorrichtungen nach Art der Fig. 1, 2, 4 und 5 einsetzbar ist,
- 5 Fig. 7 eine Seitenansicht entsprechend Fig. 6 für eine Variante mit einer zusätzlichen periodischen Struktur zum Zwecke der messtechnischen Erfassung der Pupillenverzeichnung,
- 10 Fig. 8 eine Seitenansicht entsprechend Fig. 7 für eine Variante mit zwei Linsen,
- Fig. 9 eine Seitenansicht entsprechend Fig. 6 für eine Variante, die ein Spiegelelement enthält,
- 15 Fig. 10 eine Seitenansicht entsprechend Fig. 6 für eine Variante mit mehreren einzelnen Lambda/4-Polarisatorelementen, die fest mit zueinander gedrehten Polarisationsrichtungen angeordnet sind, und
- 20 Fig. 11 ein Diagramm des Einfallswinkels als Funktion der Pupille für eine typische Optik einer Polarisationsanalysatoranordnung nach Art der Figuren 6 bis 10.
- Fig. 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer zugeordneten Vorrichtung zur Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung durch den abbildenden Systemteil. Die Projektionsbelichtungsanlage beinhaltet in üblicher Weise ein Beleuchtungssystem 1 als denjenigen Systemteil, der die gewünschte Strahlung liefert, z.B. UV-Strahlung im Wellenlängenbereich um 248nm oder 193nm, und ein nachgeschaltetes Projektionsobjektiv 2 als abbildenden Systemteil. Der insoweit herkömmliche Aufbau ist um Komponenten einer Vorrichtung erweitert, mit welcher die vom Projektionsob-
- 25
- 30

ektiv 2 verursachte Beeinflussung des Polarisationszustands der verwendeten optischen Strahlung durch eine sogenannte numerische Apertur(NA)-Messtechnik mit Ellipsometerfunktion ergänzt ist. Speziell eignet sich diese Vorrichtung zur Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix orts aufgelöst über den Pupillenbereich des Projektionsobjektivs 2 hinweg, bei dem es sich um ein optisches Abbildungssystem mit vergleichsweise hoher Apertur handelt.

Zwischen Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2 beinhaltet die Vorrichtung Mittel zur Bereitstellung eintrittsseitiger Strahlung für das Projektionsobjektiv 2 mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand. Diese beinhalten im Strahlengang hintereinander eine Streuscheibe 3, einen drehbaren Polarisator 4, einen drehbaren Kompensator 5 (optional), eine Spotlinse und eine sogenannte Pinhole- oder Lochmaske 7 mit einer oder mehreren Öffnungen. Durch die ausreichend stark streuend ausgelegte Streuscheibe 3 wird in ausreichendem Maß räumlich inkohärente Strahlung bereitgestellt. Die Lochmaske 7 ist in der Brennebene der weitestgehend homogen ausgeleuchteten Spotlinse 6 angeordnet, die gleichzeitig die Objektebene des Projektionsobjektivs 2 bildet. Dies ergibt eine räumlich möglichst inkohärente Punktlichtquelle in der Objektebene. Dem Projektionsobjektiv 2 ist ein Mikroskopobjektiv 8 nachgeschaltet, dessen Brennebene mit der Bildebene des Projektionsobjektivs 2 zusammenfällt und eine numerische Apertur aufweist, die mindestens so groß wie diejenige des untersuchten Projektionsobjektivs 2 ist. Somit bildet das Mikroskop-Objektiv 8 einen Objektpunkt in der Ebene der Lochmaske 7 nach unendlich ab, d.h. in einen reellen parallelen Strahlengang. Durch eine geeignete niederaperturige Relais-Optik 9, z.B. eine 4f-Optik, wird ein scharfes Bild der Intensitätsverteilung des parallelen Strahlenbündels auf einem Detektorelement 10 erzeugt, bei dem es sich z.B. um einen CCD-Chip einer Bildkamera handelt.

- Insoweit bilden die erwähnten Komponenten eine NA-Messapparatur, mit der bei bekannter, vorgegebener winkelabhängiger Emission der Spotlinsen-Lochmasken-Einheit 6, 7 und bei bekannter, vorgegebener winkelabhängiger Transmission der Mikroskop-Relaisoptik-Einheit 8, 9
- 5 die Transmission des Projektionsobjektivs 2 über deren gesamten Pupillenbereich hinweg orts aufgelöst bestimmt werden kann. Die Emissionsverteilung der Beleuchtung kann z.B. vorab durch winkelvariable Abtastung mittels einer goniometrisch aufgehängten Messdiode bestimmt werden. Eine Kalibrierung der Mikroskopeinheit ist durch rückseitige
- 10 Durchstrahlung mit einem Parallelbündel bekannter Intensitätsverteilung und wiederum Abtastung des fokalen Aperturkegels mit einer goniometrischen Messvorrichtung möglich. Die abrasternde Methode mit goniometrischer Messvorrichtung ist zwar an sich auch für die vorliegend interessierende Untersuchung des Projektionsobjektivs 2 möglich, der
- 15 Vorteil der hier beschriebenen Vorgehensweise ist jedoch, dass mit einer so kalibrierten Vorrichtung viele Feldpunkte des Projektionsobjektivs 2 quasi gleichzeitig bzw. jedenfalls in relativ kurzer Zeit vermessen werden können.
- 20 Durch Hinzufügen geeigneter polarisationsoptischer Komponenten erhält diese NA-Messapparatur eine Ellipsometerfunktion, die eine pupillenaufgelöste Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix für das Projektionsobjektiv 2 ermöglicht. Dazu dienen zum einen der drehbare Polarisator 3 und der drehbare Kompensator 5 auf der Eintritts- bzw. Be-
- 25 leuchtungsseite des Projektionsobjektivs 2 und zum anderen ein austrittsseitiger drehbarer Kompensator 11 und diesem nachgeschaltet ein austrittsseitiger Polarisator 12 zwischen der Relais-Optik 9 und dem CCD-Detektor 10. Die Kalibrierung des Beleuchtungsteils 6, 7 und der Mikroskopeinheit 8 kann durch goniometrisches Abtasten der betreffen-
- 30 den Aperturkegel mittels einer herkömmlichen Ellipsometereinheit erfolgen. Dabei werden die zugehörigen parallelen Strahlengänge durch die

Polarisator- und Kompensatoranordnung als mindestens vier linear unabhängige Polarisationszustände vorgegeben.

Speziell können dann beleuchtungsseitig nacheinander vier unterschiedliche Polarisationszustände eingestellt werden, die vier linear unabhängigen Stokes-Vektoren entsprechen, und ausgangsseitig können die resultierenden Stokes-Vektoren der vom Projektionsobjektiv 2 transmittierten Strahlung gemessen werden. Aus den eintrittsseitigen und austrittsseitigen Stokes-Vektoren ergibt sich nach bekannten Beziehungen die Müller-Matrix, aus der wiederum die phasenreduzierte Jones-Matrix abgeleitet werden kann, wie aus der einschlägigen Literatur bekannt.

Diese Auswertung erfolgt durch eine in Fig. 1 lediglich schematisch in Ankopplung an den CCD-Detektor 10 gezeigte Auswerteeinheit 13, die zu diesem Zweck geeignet ausgelegt ist. Die der Projektionsbelichtungsanlage mit Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2 zugeordnete Vorrichtung ermöglicht somit eine simultane zweidimensionale Bestimmung der phasenreduzierten Jones-Matrix pupillenaufgelöst, d.h. die Elemente der Jones-Matrix und damit die polarisierende Eigenschaft des Projektionsobjektivs 2 werden orts aufgelöst über den Pupillenbereich des hochaperturigen Projektionsobjektivs 2 hinweg als Funktion der Pupillencoordinate bestimmt.

Dadurch kann der Einfluss des Projektionsobjektivs 2 auf den Polarisationszustand der auf einen Wafer gerichteten Belichtungsstrahlung rasch und genau bestimmt werden. Dieser Einfluss nimmt bei modernen mikrolithographischen Projektionsobjektiven mit hoher numerischer Apertur an Bedeutung zu, beispielsweise wegen Doppelbrechungseffekten bei den für kurze Wellenlängen verwendeten Calciumfluoridlinsen und wegen Polarisierungseffekten durch Umlenkspiegel. Die orts aufgelöste Kenntnis dieser Einflüsse des Projektionsobjektivs auf den Polarisationszustand der Strahlung kann dann geeignet dazu

genutzt werden, ein gewünschtes Abbildungs-/Belichtungsverhalten der Projektionsbelichtungsanlage zu erzielen.

Fig. 2 zeigt eine Variante der Anordnung von Fig. 1, wobei der Übersichtlichkeit halber für funktionell gleiche Elemente dieselben Bezugs-  
5 zeichen gewählt sind und insoweit auf die obige Beschreibung des Beispiels von Fig. 1 verwiesen werden kann. Insbesondere handelt es sich auch im Beispiel von Fig. 2 um eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2, dessen polarisierende Eigenschaft durch eine zugeordnete Vorrichtung un-  
10 tersucht wird, wobei der Aufbau zwischen Beleuchtungssystem 1 und Projektionsobjektiv 2 demjenigen von Fig. 1 entspricht.

Wie erwähnt, wird durch die Vorrichtung von Fig. 1 die pupillenaufgelöste Jones-Matrix phasenreduziert bestimmt, d.h. bis auf einen globalen,  
15 pupillenortsabhängigen Phasenterm. Die im Ausführungsbeispiel von Fig. 2 verwendete Vorrichtung ist in der Lage, diesen globalen Phasenterm durch eine Shearing-Interferometriemesstechnik bei definiertem Eintritts-Polarisationszustand zu ermitteln. Dazu beinhaltet diese Vor-  
20 richtung an der Austrittsseite des untersuchten Projektionsobjektivs 2 eine Shearing-Interferometereinheit 14, an die sich der CCD-Detektor 10 anschließt. An letzteren ist eine geeignet ausgelegte Auswerteeinheit 13a angekoppelt.

25 Die Shearing-Interferometereinheit ist von einem an sich herkömmlichen Aufbau, wie er z.B. in der oben erwähnten DE 101 09 929 A1 und der ebenfalls oben erwähnten älteren deutschen Patentanmeldung 102 17 242.0 beschrieben ist, worauf für weitere Details verwiesen werden kann. In der Auswerteeinheit 13a sind die benötigten Steuerungs- und  
30 Auswerteprozesse implementiert, wie sich dies für den Fachmann aus der vorliegenden Beschreibung der zugehörigen Prozessschritte ohne weiteres ergibt. Zur Erläuterung ist in Fig. 3 schematisch die zugrunde

liegende Zweistrahl-Interferometrie im Jones-Matrix-Kalkül dargestellt. Demgemäß ergibt sich die austrittsseitige Strahlungsintensität für die Überlagerung zweier Felder, die durch eine originale Jones-Matrix  $T$  und eine um  $\Delta x$  verschobene Jones-Matrix  $T_{\Delta}$  repräsentiert werden, aus der

5 Spurbildung eines Matrixprodukts der Summenmatrix  $T+T_{\Delta}$  mit der Eintritts-Polarisationsmatrix  $P_{in}$  und der hermitisch konjugierten Summenmatrix  $(T+T_{\Delta})^+$ . Wenn die originale und die verschobene Jones-Matrix  $T$  bzw.  $T_{\Delta}$  jeweils bis auf einen konstanten Phasenfaktor bekannt sind, kann ihre Phasendifferenz  $\Delta\alpha$  aus der Beziehung

10

$$\exp[i\Delta\alpha] = Q / \text{Spur} [TP_{in}T_{\Delta}^+]$$

ermittelt werden, wobei  $Q = \text{Spur} [TP_{in}T_{\Delta}^+]$  und  $T$  sowie  $T_{\Delta}$  die phasenreduzierte originale bzw. verschobene Jones-Matrix bezeichnen. Die im

15 allgemeinen komplexe Zahl  $Q$  kann messtechnisch durch die Shearing-Interferometereinheit 14 aus Amplitude und Phase des Modulationssignals unter Verwendung der Phasenschiebetechnik gewonnen werden. Da der vorliegend betrachtete Einsatz der Shearing-Interferometrie die Verwendung derselben Strahlung erlaubt, die im eigentlichen Nutzbe-

20 trieb des Polarisationsobjektivs 2 benutzt wird, wird diese Messtechnik auch als Betriebsinterferometer(BIF)-Messtechnik bezeichnet.

Durch eine Integration lässt sich dann der räumliche Verlauf der Phase  $\alpha(x)$  über die Pupillenkoordinate  $x$  ermitteln. Dies ermöglicht die Be-

25 stimmung der vollständigen Jones-Matrix für das Projektionsobjektiv 2, wenn die phasenreduzierte Jones-Matrix bereits bekannt ist, z.B. aus der ellipsometrischen NA-Messung mit der Vorrichtung von Fig. 1. Voraussetzung ist lediglich, dass der Polarisationszustand der Beleuchtung, d.h. an der Eintrittsseite des Projektionsobjektivs 2, bei der BIF-Messung

30 von Fig. 2 vollständig bekannt ist, wobei er auch vollständig unpolarisiert sein darf. Im Beispiel von Fig. 2 wird der definierte, vollständig polarisierte eintrittsseitige Strahlungszustand durch die Verwendung des eintritts-

seitigen Polarisators 4 und des optionalen eintrittsseitigen Kompensators 5 bewirkt.

Da aus der komplexen Zahl  $Q = \text{Spur}(TP_{\text{in}}T_{\Delta}^+)$  als solches nicht auf die  
 5 einzelnen Jones-Matrixelemente geschlossen werden kann, erlaubt die  
 Vorrichtung gemäß Fig. 2 allein keine Bestimmung der phasenreduzier-  
 ten Jones-Matrix. Dies ermöglicht hingegen die Anordnung gemäß Fig.  
 4, die gegenüber derjenigen von Fig. 2 dahingehend modifiziert ist, dass  
 zwischen der Shearing-Interferometereinheit 14 und dem CCD-Detektor  
 10 ein drehbarer Polarisator 15 vorgesehen ist. Dafür wird im Beispiel  
 von Fig. 4 auf den optionalen eintrittsseitigen Kompensator des Bei-  
 spiels von Fig. 2 verzichtet. Im übrigen entsprechen sich die beiden Aus-  
 führungsbeispiele in ihrem Aufbau.

15 Durch den eintrittsseitigen drehbaren Polarisator 4 und den austrittssei-  
 tigen drehbaren Polarisator 15 können bei der Vorrichtung von Fig. 4 die  
 einzelnen Elemente der Jones-Matrix herausprojiziert werden. So ergibt  
 sich für die Spur  $Q$  bei eintritts- und austrittsseitiger Einstellung eines in  
 x-Richtung linear polarisierten Zustands der Wert  $T_{xx}T_{\Delta xx}^+$ . Mit dem An-  
 20 satz  $T_{xx} = a \cdot \exp[i\varphi]$  für das Matrixelement  $T_{xx}$  ergibt dies für den mess-  
 technisch durch die Shearing-Interferometereinheit 14 bestimmbaren  
 Spurwert  $Q$  die Beziehung

$$Q = a(a + \Delta a) \exp[-i\Delta\varphi]$$

25

und somit einen differentiellen Ausdruck für den Betrag  $a(a + \Delta a)$  und die  
 Phase  $-i\Delta\varphi$ , so dass sich das Jones-Matrixelement  $T_{xx}$  durch numeri-  
 sche Integration über die Pupillenkoordinate bestimmen lässt. Dabei ist  
 die Phasenfläche  $\varphi$  nur bis auf eine für alle Pupillenorte gleiche Integra-  
 30 tionskonstante bestimmt.

- In gleicher Weise können durch Einstellen eines in y-Richtung linear polarisierten Eintritts- bzw. Austrittszustand die anderen Matrixkomponenten  $T_{yx}$ ,  $T_{xy}$  und  $T_{yy}$  und damit die gesamte phasenreduzierte Jones-Matrix ermittelt werden. Die vier Jones-Matrixelemente werden mit Betrag und Phase als Funktion der Pupillenkoordinate bestimmt, die vier zugehörigen Phasenflächen stehen jedoch in keiner definierten Beziehung zueinander, weil ihre Integrationskonstanten nicht bekannt sind. Dem kann z.B. dadurch abgeholfen werden, dass für wenigstens einen Punkt des Pupillenbereichs eine ellipsometrische Messung durchgeführt wird, deren Messergebnis die fehlende Beziehung zwischen den vier Phasenflächen herstellt. Hierfür genügt eine Messung mit einem kommerziellen, einachsigen Ellipsometer, z.B. entlang der optischen Achse des Projektionsobjektivs 2.
- 15 Anstelle eines Shearing-Interferometers kann auch ein mit entsprechenden Polarisationsanalysatormitteln ausgestattetes Punktbeugungs-Interferometer zur Messung der vollständigen Jones-Matrix vollständig pupillenaufgelöst verwendet werden. Fig. 5 zeigt eine vorteilhafte Ausführungsform eines solchen. Zusätzlich zu den in Fig. 4 verwendeten
- 20 Komponenten kommt beim Punktbeugungs-Interferometer ein Beugungsgitter 16 zum Einsatz, das die durch die Pinholemaske 7 erzeugte Kugelwelle mittels Beugungseffektes in verschiedene Teilwellen aufspaltet, die hier durch zwei Strahlengänge 19 und 20 angedeutet sind. Die beiden Teilwellen durchlaufen das Projektionsobjektiv 2 auf ähnlichen Trajektorien und werden anschließend durch Fokussierung auf unterschiedlich große Pinholes einer entsprechenden Pinholemaske 7a in eine Testwelle und eine Referenzwelle überführt. Aufgrund der Kohärenz der beiden Teilwellen entsteht ein Interferogramm der gesamten
- 25 Objektivapertur, welches mit Hilfe einer Strahlformungsvorrichtung 18 auf den CCD-Detektor 10 abgebildet wird. Dieses Interferogramm kann analog zu dem Verfahren mit einem Shearing-Interferometer von Fig. 4
- 30 mit Polarisationsanalysationsmitteln, wie dem gezeigten Polarisator 15,



kombiniert werden, um polarisationsabhängige Wellenfronten und somit analog zum Verfahren mit Shearing-Interferometer die Jones-Matrix des Projektionsobjektives zu erhalten. Zum Zwecke der Steigerung der Phasenmessgenauigkeit kann auch beim Punktbeugungs-Interferometer die Methode der Phasenschiebung angewandt werden, was durch eine ak-  
5 tuatorische Einheit 17 angedeutet ist.

In den Fig. 6 bis 10 sind verschiedene Polarisationsanalysatoranordnungen gezeigt, die als Polarisationsdetektionsteil in den Vorrichtungen der Fig. 1, 2, 4 und 5 verwendbar sind, die sich dort aber auch objektseitig zur Präparation eines gewünschten, definierten Polarisationszustands, in diesem Fall ohne Detektorelement, und darüber hinaus in beliebigen anderen Vorrichtungen verwenden lassen. bei denen Bedarf an einer orts- bzw. pupillenaufgelösten Polarisationszustandsmessung be-  
10 steht.  
15

Speziell umfasst die in Fig. 6 gezeigte Analysatoranordnung in Lichteinfallrichtung von oben nach unten nacheinander eine strahlformende Linseneinheit in Form einer Konvexlinse 23, eine Polarisatoreinheit bzw. einen Kompensator in Form einer Lambda/4-Platte 24, einen Polarisator 25, z.B. in Form eines Polarisationsstrahlteilerelements, wie eines Polteilerwürfels, sowie ein flächiges Detektorelement 26, das insbesondere ein CCD-Bildsensor einer Bildaufnahmekamera sein kann. Ferner sind die optische Achse 27 des Systems und der Verlauf eines schräg einfal-  
20 lenden Lichtstrahls 28 dargestellt.  
25

In Verbindung mit einem objektseitig z.B. in der Objekt- bzw. Retikellebene eines zu untersuchenden Lithographieobjektivs angeordneten Polarisatorelement ermöglicht die solchermaßen aufgebaute Analysatoranordnung von Fig. 6 durch Rotation der Lambda/4-Platte 24 eine  
30 orts- bzw. pupillenaufgelöste ellipsometrische Vermessung des zu un-

tersuchenden optischen Systems und somit eine Bestimmung von dessen Polarisationszustandsbeeinflussung.

Fig. 7 zeigt eine Variante der Analysatoranordnung von Fig. 6, wobei der Übersichtlichkeit halber funktionell äquivalente Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen sind. Im Unterschied zur Anordnung von Fig. 6 ist bei der Analysatoranordnung von Fig. 7 eintrittsseitig ein zusätzliches Substrat 22 mit einer periodischen Struktur 21 vorgesehen. Bei dieser periodischen Struktur 21 kann es sich insbesondere um ein Shearing-Beugungsgitter für die Scherinterferometriemessung handeln. Die Struktur 21 kann, wie in Fig. 7 dargestellt, als eigenständiges Substrat losgelöst von einer strahlformenden Linseneinheit 23 vorliegen, oder es kann die Linseneinheit, wenn sie als Plankonvexlinse ausgeführt wird, mit der Planseite nach oben am Substrat 22 der Struktur 21 angesprengt oder anderweitig befestigt sein. Als weitere Alternative kann die Struktur 21 direkt auf der oberen Planseite einer solchen Plankonvexlinse aufgebracht werden. Während sich die Anordnung mit am Substrat angesprengter oder befestigter Plankonvexlinse besonders für Messvorrichtungen eignet, bei denen im Betrieb eine gemeinsame Lateralbewegung der Struktur 21 mit dem Detektorelement 26 vorgesehen ist, ist die bewegungsmäßige Entkopplung von Substrat 22 mit darauf aufgebrachter Struktur 21 und Linseneinheit 23 für Systeme vorteilhaft, bei denen die Struktur 21 und das Detektorelement 26 relativ zueinander lateral bewegt werden, z.B. nur die Struktur 21 oder nur das Detektorelement 26.

25

Das Grundkonzept der erfindungsgemäßen Analysatoranordnung besteht darin, mit einer relativ einfachen Detektionsoptik auszukommen, welche die Strahlen soweit umlenkt, dass sie derart auf das Polteiler-element 25 treffen, dass sie von ihm ausreichend polarisiert werden, wobei in Kauf genommen wird, dass in der Detektionsebene 26 ein verzeichnetes Pupillenbild des zu untersuchenden Objektivs entsteht, was durch geeignete Korrekturmaßnahmen kompensiert wird. Eine insbe-

30

sondere für hochaperturige, zu untersuchende optische Systeme, wie hochaperturige Lithographieobjektive, zweckmäßige Korrekturmaßnahme besteht in einer mehrkomponentigen Auslegung der Detektionslin-seneinheit. Beispielhaft zeigt hierzu Fig. 8 als weitere Variante eine Ana-  
5 lysatoranordnung, bei welcher die strahlformende Einheit aus zwei auf-einanderfolgenden, insbesondere asphärischen Linsen 23a, 23b be-steht. Dies ermöglicht eine Verringerung der Verzeichnungsfehler und die Vermeidung von Totalreflexions-Einfallswinkeln. In jedem Fall ist bei hochaperturigen Systemen aufgrund der auftretenden hohen Einfalls-  
10 winkel zudem eine Antireflexbeschichtung des oder der Linsenelemente zweckmäßig.

Fig. 9 zeigt eine weitere Variante der Analysatoranordnung von Fig. 6, wobei ein oder mehrere refraktive optische Elemente durch ein Spiegel-  
15 element 29 ersetzt sind, das auf eine Konvexlinse 23c folgt und eine Umlenkung der optischen Achse 27 des Systems bewirkt, z.B. wie ge-zeigt um  $90^\circ$ . Dabei können auch mehrere Spiegelemente zur Anwen-dung kommen, und die Spiegelflächen können plan, sphärisch oder asphärisch sein. Vorteile einer solchen Anordnung können z.B. die Ver-  
20 ringerung der Bauhöhe sowie geringere chromatische Bildfehler der An-ordnung sein.

Während bei den Analysatoranordnungen der Fig. 6 bis 9 im Betrieb die Lambda/4-Platte 24 zur Messung der Ellipsometriewinkel gedreht wird,  
25 zeigt Fig. 10 eine weitere Analysatorvariante, bei der als Kompensator-elemente mehrere einzelne Lambda/4-Polarisatorelemente 24a, 24b, 24c, wie einzelne Lambda/4-Plättchen, mit in einer vorgegebenen Be-ziehung zueinander gedrehten Polarisationsrichtungen fest angeordnet sind, so dass im Betrieb keine Rotation derselben erforderlich ist. Dies  
30 realisiert eine Polarisationsanalysatoranordnung, die keine aktiv beweg-ten Teile aufweist. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass in gleicher Wei-se eine objektseitige Polarisatoreinheit für die ellipsometrischen Mes-

sungen aus einzelnen, fest angeordneten Lambda/4-Plättchen mit gedrehten Polarisationsrichtungen aufgebaut sein kann. Die einzelnen Lambda/4-Plättchen 24a, 24b, 24c sind im Beispiel von Fig. 10 auf je einem Polteilerwürfel 25a, 25b, 25c angebracht. Alternativ können mehrere, vorzugsweise alle Lambda/4-Plättchen gemeinsam auf einem Polteilerwürfel fixiert sein. Für die so gebildeten, einzelnen Kanäle ist die Linseneinheit dazu passend aus einem Feld von Einzellinsen 23d, 23e, 23f aufgebaut, die im Beispiel von Fig. 10 an der Substratunterseite fixiert sind.

10

Was den Typ der in der Detektionslinseneinheit verwendeten Linsen betrifft, so kommen je nach Bedarf, wie zum Teil bereits erwähnt, insbesondere eine oder mehrere einfache sphärische Linsen, eine oder mehrere asphärische Linsen oder eine diffraktive Linse in Betracht. Linseneinheiten mit einer sphärischen Einzellinse können für zu untersuchende Systeme mit kleineren Aperturwinkeln gut geeignet sein. Für höhere numerische Aperturen sind Mehrlinsensysteme, asphärische Linsen oder diffraktive Linsen von Vorteil, um das Überschreiten des Totalreflexionswinkels zu vermeiden und die Einfallswinkel auf das Polteilererelement 25 ausreichend klein zu halten, da dieses nur für einen relativ engen Einfallswinkelbereich seine Polarisationsstrahlteilungsfunktion im geforderten Maß erfüllt. Außerdem nimmt die Pupillenauflösung im allgemeinen zum Rand hin stark ab.

Fig. 11 veranschaulicht hierzu in einem Kennliniendiagramm einen typischen Verlauf des Einfallswinkels (i-Winkel) als Funktion der Pupille. Der schon oben erwähnte Pupillenverzeichnungsfehler kann durch Verwenden einer oder mehrerer asphärischer Linsen oder einer diffraktiven Linse anstelle einer sphärischen Linse vermindert werden. Eine diffraktive Linse kann z.B. durch Ausbilden einer entsprechenden diffraktiven Struktur an der Unterseite des an seiner Oberseite die periodische Struktur 21 tragenden Substrats 22 realisiert werden. Die Gitterperiode

- dieser diffraktiven Struktur wird lokal so angepasst, dass der Strahl entsprechend seines Aperturwinkels umgelenkt wird. Zur Vermeidung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Kanälen wird der Abstand des oder der Polteiler-elemente so gewählt, dass die unerwünschten
- 5 Beugungsordnungen nicht im Fangbereich des oder der Polteiler-elemente liegen. Um ein Zahlenbeispiel zu nennen, ergeben sich bei einer numerischen Apertur von 0,85 und einer Lichtwellenlänge von 193nm typische Gitterperioden in der Größenordnung von 230nm.
- 10 Zusätzlich bzw. unabhängig von den oben erwähnten linsenseitigen Maßnahmen, die dazu dienen, die Einfallswinkel und die Verzeichnungsfehler möglichst gering zu halten, wird das auf der Detektorebene 26 entstehende, verzeichnete Pupillenbild des zu untersuchenden optischen Systems im an das Detektorelement 26 angeschlossenen Aus-
- 15 werteteil geeignet kompensiert bzw. korrigiert. Diese Verzeichnungs- bzw. Verzerrungskorrektur kann mittels optischer Rechenverfahren, z.B. Raytracing, oder durch messtechnische Bestimmung der Verzeichnung des Pupillenbildes am ausgelegten Optiksistem erfolgen. Es können unter anderem folgende messtechnische Methoden verwendet werden:
- 20 Abbildung von Referenzmustern in der Pupille des Projektionsobjektives auf dem Detektorelement 26, Moiré-Technik, Phasendifferenzmessung oder Vergleich von Interferenzstreifen mit rechnerischen Sollpositionen auf dem Detektorelement 26 bei fester oder variabler Fokusposition der Polarisationsanalysatoranordnung. Bei diesen Methoden handelt es sich
- 25 um an sich bekannte Techniken, die daher hier keiner näheren Erläuterung bedürfen. Durch diese Techniken können die Informationen gewonnen werden, die zur Verzerrungskorrektur des Pupillenbildes in der Detektorebene benötigt werden, wie der entsprechenden Pupillenbild-Interferogramme.
- 30
- Der Realisierung der vorgenannten messtechnischen Methoden dient die Verwendung der periodischen Struktur 21. Auch eine Kombination

aus optischer Rechnung und messtechnischer Erfassung mit dem Ziel der Entzerrung des Pupillenbildes ist möglich.

Mit Hilfe dieser auswerteseitigen Korrekturmaßnahme ist es nicht zwingend erforderlich, detektionsseitig ein Mikroskopobjektiv zu benutzen, das einen über das gesamte Detektionsfeld des Detektorelements 26 konstanten Scherabstand gewährleistet. Stattdessen kann eine einfachere Detektionsoptik verwendet werden, bei dem die Sinusbedingung nicht erfüllt ist. Der Effekt der solchermaßen nicht optimalen Abbildung durch die detektionsseitige Optik wird durch optische Rechenverfahren, z.B. Raytracing, oder durch Phasendifferenzmessung bestimmt und bei der Auswertung des Pupillenbild-Interferogramms korrektiv berücksichtigt. Analoges gilt für Verzerrungsfehler, die durch eine nicht optimale Justierung der Optik verursacht werden. Das gleiche gilt für reine Wellenfrontmessungen ohne jegliche Anordnung von Polarisationsanalytoren, bei welchen gar keine strahlformenden optischen Systeme zur Pupillenabbildung verwendet werden.

Wie die oben erläuterten Ausführungsbeispiele deutlich machen, ermöglicht die Erfindung mit vertretbarem Aufwand eine sehr genaue und rasche Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands von Strahlung durch ein Abbildungssystem mittels NA-Messtechnik in Kombination mit Ellipsometrie und/oder durch eine Shearing-Interferometertechnik mit oder ohne austrittsseitigem Polarisationsanalysator. Dabei leistet die Erfindung insbesondere eine pupillenaufgelöste Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands als Funktion der Pupillenkoordinate auch für hochaperturige Abbildungssysteme, wie moderne Projektionsobjektive von Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen. Es versteht sich, dass die Erfindung außer für solche Projektionsobjektive auch für beliebige andere optische Abbildungssysteme anwendbar ist, deren Einfluss auf den Polarisationszustand orts aufgelöst erfasst werden soll.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein untersuchtes optisches System, bei dem
  - auf das optische System eintrittsseitige Strahlung mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand gerichtet wird,
  - der Austritts-Polarisationszustand von aus dem optischen System austretender Strahlung gemessen wird und
  - die Polarisationszustandsbeeinflussung durch das optische System mittels Auswertung des gemessenen Austritts-Polarisationszustands bezogen auf den Eintritts-Polarisationszustand bestimmt wird,  
dadurch gekennzeichnet, dass
  - die durch ein optisches Abbildungssystem vorgebbarer Apertur verursachte Beeinflussung des Polarisationszustands pupillenaufgelöst bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, weiter dadurch gekennzeichnet, dass der definierte Eintritts-Polarisationszustand in einer Objektebene des Abbildungssystems bereitgestellt wird und der Austritts-Polarisationszustand innerhalb eines vorgebbaren Pupillenbereichs des Abbildungssystems pupillenaufgelöst gemessen wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, weiter dadurch gekennzeichnet, dass als eintrittsseitige Strahlung eine von der Objektebene des Abbildungssystems ausgehende, räumlich inkohärente Punktlichtstrahlung bereitgestellt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Auswertung eine Ermittlung der phasenre-

duzierten Jones-Matrix beinhaltet und eine zugehörige ellipso-metrische Messung durchgeführt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Bereitstellung des definierten Eintritts-polarisationszustands, die Messung des Austritts-Polarisations-zustands und die Auswertung eine Shearing-Interferometriemessung oder eine Punktbeugungs-Interferometriemessung beinhalten.
6. Verfahren nach Anspruch 5, weiter dadurch gekennzeichnet, dass das Ergebnis der Shearing-Interferometriemessung oder der Punktbeugungs-Interferometriemessung einer nachgeschalteten Polarisationsanalyse unterzogen wird.
7. Verfahren, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 6, zur Bildkorrektur, dadurch gekennzeichnet, dass die Verzeichnung einer Pupillenabbildung durch ein optisches Abbildungssystem vorgegebbarer Apertur mittels optischer Rechnung oder messtechnischer Erfassung oder einer Kombination aus beiden ermittelt und rechnerisch korrigiert wird.
8. Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisations-zustands optischer Strahlung durch ein untersuchtes optisches System, mit
  - Mitteln (1 bis 7) zur Bereitstellung von auf das optische System gerichteter, eintrittsseitiger Strahlung mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand,
  - Polarisationsdetektormitteln (8 bis 12; 14, 15) zur Messung des Austritts-Polarisationszustands von aus dem optischen System austretender Strahlung und



- einer Auswerteeinheit (13, 13a) zur Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung durch das optische System mittels Auswertung des gemessenen Austritts-Polarisationszustands bezogen auf den Eintritts-Polarisationszustand, dadurch gekennzeichnet, dass
  - die Polarisationsdetektormittel (8 bis 12; 14, 15) zur pupillenaufgelösten Messung des Austritts-Polarisationszustands eingerichtet sind und
  - die Auswerteeinheit (13, 13a) zur pupillenaufgelösten Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung eingerichtet ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Bereitstellung der eintrittsseitigen Strahlung eine Lochmaske (7) in einer Objektebene des Abbildungssystems (2) und vorgeschaltete erste Polarisationsmittel (4, 5) beinhalten.
10. Vorrichtung nach Anspruch 9, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die ersten Polarisationsmittel eine Polarisatoreinheit (4) und/oder in serieller Anordnung eine Kompensatoreinheit (5) beinhalten, die in verschiedenen räumlichen Orientierungen einstellbar sind.
11. Vorrichtung nach Anspruch 9 oder 10, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Bereitstellung der eintrittsseitigen Strahlung eine Streuscheibe (3) vor den ersten Polarisationsmitteln beinhalten.
12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsdetektormittel einen CCD-Detektor (10) und vorgeschaltete zweite Polarisationsmittel (11, 12; 15) beinhalten.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Polarisationsdetektormittel eine Shearing-Interferometereinheit (14) oder eine Punktbeugungs-Interferometrieeinheit beinhalten.
14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 13, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die Auswerteeinheit (13, 13a) zur Bestimmung der phasenreduzierten oder vollständigen, pupillenaufgelösten Jones-Matrix eingerichtet ist.
15. Polarisationsanalysatoranordnung, insbesondere zur Verwendung als Polarisationsdetektormittel oder Polarisationspräparationsmittel in der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 14, gekennzeichnet durch folgende, im Strahlengang hintereinander angeordnete Elemente:
  - eine periodische Struktur (21),
  - eine strahlformende Einheit (23, 29),
  - eine Kompensator-Polarisatoreinheit (24) und
  - ein Polarisationsanalysatorelement (25), insbesondere ein Polarisationsstrahlteiler-element.
16. Polarisationsanalysatoranordnung, insbesondere nach Anspruch 15, gekennzeichnet durch folgende, im Strahlengang hintereinander angeordnete Elemente:
  - eine strahlformende Einheit (23, 29),
  - eine Kompensator-Polarisatoreinheit (24), die mehrere Kompensatorelemente (24a, 24b, 24c) umfasst, die mit zueinander gedrehten Polarisationsrichtungen fest angeordnet sind, und
  - ein Polarisationsanalysatorelement (25), insbesondere ein Polarisationsstrahlteiler-element.

17. Polarisationsanalysatoranordnung nach Anspruch 15 oder 16, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die strahlformende Einheit eine oder mehrere sphärische und/oder asphärische refraktive Einzel-linsen (23), eine oder mehrere diffraktive Linsen, eine oder mehrere sphärische und/oder asphärische Spiegelemente oder eine Kombination der genannten optischen Elemente beinhaltet.
18. Polarisationsanalysatoranordnung nach einem der Ansprüche 15 bis 17, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die periodische Struktur (21) mit einem nach dem Polarisationsanalysatorelement angeordneten Detektorelement (26) lateral bewegungsgekoppelt oder lateral relativ zu diesem beweglich angeordnet ist.
19. Polarisationsanalysatoranordnung nach einem der Ansprüche 15 bis 18, weiter dadurch gekennzeichnet, dass sie zur Verwendung als Polarisationsdetektormittel auf der Bildseite und/oder als Polarisationspräparationsmittel auf der Objektseite des zu untersuchenden optischen Abbildungssystems ausgelegt ist.

### Zusammenfassung

1. Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Polarisationszustandsbeeinflussung durch ein optisches System und Analysator.

5

- 2.1. Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein untersuchtes optisches System, wobei auf das optische System Strahlung mit definiertem Eintritts-Polarisationszustand gerichtet wird, der austrittsseitige Polarisationszustand gemessen und die Beeinflussung des Polarisationszustands durch das optische System mittels Auswertung des Austritts-Polarisationszustands bezogen auf den Eintritts-Polarisationszustand bestimmt wird, sowie auf eine hierbei verwendbare Analysatoranordnung.

15

- 2.2. Erfindungsgemäß werden das Verfahren und die Vorrichtung zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands optischer Strahlung durch ein optisches Abbildungssystem vorgegebbarer Apertur angewendet, wobei die Bestimmung pupillenaufgelöst erfolgt.

20

- 2.3. Verwendung z.B. zur Bestimmung der Beeinflussung des Polarisationszustands von UV-Strahlung durch ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage.

25

3. Fig. 1.

-----